



**RHAIANY FERNANDES FERREIRA**

**COMPORTAMENTO SAZONAL DO SALDO DE  
RADIÇÃO NA CIDADE DE SETE LAGOAS-MG**

**LAVRAS-MG  
2023**

**RHAIANY FERNANDES FERREIRA**

**COMPORTAMENTO SAZONAL DO SALDO DE RADIAÇÃO NA CIDADE  
DE SETE LAGOAS-MG**

**SEASONAL BEHAVIOR OF RADIATION BALANCE IN THE CITY OF SETE  
LAGOAS-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Prof.<sup>a</sup> DSc. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi  
Orientadora

**LAVRAS-MG  
2023**

**RHAIANY FERNANDES FERREIRA**

**COMPORTAMENTO SAZONAL DO SALDO DE RADIAÇÃO NA CIDADE  
DE SETE LAGOAS-MG**

**SEASONAL BEHAVIOR OF RADIATION BALANCE IN THE CITY OF SETE  
LAGOAS-MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 21 de julho de 2023.

DSc. Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi UFLA

MSc. Arthur Boari UFLA

MSc. Olívio Bahia do Sacramento Neto INMET

Profa. DSc. Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi

Orientadora

**LAVRAS-MG**

**2023**

## AGRADECIMENTOS

Neste momento especial de conclusão do meu TCC, desejo expressar meus mais profundos agradecimentos a todas as pessoas que aprecio para tornar este sonho realidade.

Primeiramente, agradeço a Deus por me guiar, me fortalecer e me prover a sabedoria necessária para superar os desafios acadêmicos.

Aos meus pais, irmãos, sobrinho, avós e cunhados, meu sincero agradecimento por todo o amor, apoio e incentivo ao longo desta jornada. Sem a presença e o apoio de vocês, nada disso seria possível.

Aos meus amigos, obrigado por estarem ao meu lado, compartilhando alegrias e dificuldades, e por compreenderem minha ausência em alguns momentos devido aos estudos. Vocês foram uma parte essencial desta caminhada.

À minha orientadora, meu reconhecimento por sua orientação valiosa, paciência e incentivo ao longo deste processo. Sua expertise e orientação foram fundamentais para o sucesso deste trabalho.

A todos os professores e colaboradores da UFLA, meu agradecimento pelo conhecimento compartilhado, pelas oportunidades de aprendizado e por fazerem da universidade um ambiente enriquecedor.

Por fim, aos membros da banca do TCC, agradeço por dedicarem seu tempo e perícia na avaliação do meu trabalho. Suas contribuições foram fundamentais para o aprimoramento deste projeto.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC, meu profundo agradecimento. Cada palavra de incentivo, gesto de apoio ou ajuda prestada fez a diferença em minha trajetória acadêmica.

Muito obrigado a todos!

## RESUMO

O estudo do saldo de radiação é importante para compreender as transferências de energia que ocorrem no sistema Terra-Atmosfera. Assim, o propósito desta pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento sazonal do saldo de radiação na cidade de Sete Lagoas – MG. Foram utilizados dados das variáveis meteorológicas temperatura e umidade relativa do ar e número de horas de brilho solar sem a presença de nuvens, insolação, obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram estudados três períodos: 1961 a 1982; 1993 a 2015 e 2016 a 2022, sendo os dois primeiros períodos obtidos por meio da estação meteorológica convencional e o último período obtido por meio da estação meteorológica automática, com a finalidade de analisar maior período de observação sem a presença de falhas. Posteriormente, foram estimadas a radiação solar global incidente, por meio do método de Angström-Prèscott, e a energia disponível, pelo método do balanço de ondas curtas e ondas longas. Os resultados ilustram a forte influência e domínio do balanço de ondas curtas no saldo de radiação ( $R_n$ ) e uma forte sazonalidade ao longo dos anos estudados, com maiores disponibilidades de energia no verão com valor médio de  $12,74 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e primavera com valor médio  $11,60 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e com menores disponibilidades de energia no outono com o valor médio de  $6,85 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e no inverno com valor médio de  $6,14 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Palavras-chave: Radiação solar global. Disponibilidade de energia. Balanços de radiação de ondas curtas e ondas longas.

## ABSTRACT

The study of the radiation balance is important to understand the energy transfers that occur in the Earth-Atmosphere system. Thus, the purpose of this research is to evaluate the seasonal behavior of the radiation balance in the city of Sete Lagoas - MG. Data from the meteorological variables temperature and relative humidity of the air and number of hours of sunlight without the presence of clouds, insolation, obtained through the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP) belonging to the National Institute of Meteorology (INMET) were used. . Three periods were studied: 1961 to 1982; 1993 to 2015 and 2016 to 2022, with the first two periods obtained using a conventional meteorological station and the last period obtained using an automatic meteorological station, in order to analyze a longer period of observation without the presence of failures. Subsequently, the incident global solar radiation was estimated, using the Angström-Prèscott method, and the available energy, using the shortwave and longwave balance method. The results illustrate the strong influence and dominance of the shortwave balance on the net radiation ( $R_n$ ) and a strong seasonality over the years studied, with greater availability of energy in the summer with an average value of 12.74 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> and spring with an average value of 11.60 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> and with lower energy availability in autumn with an average value of 6.85 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> and in winter with an average value of 6.14 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup> .

Keywords: Global solar radiation. Energy availability. Short wave balance. Long wave balances.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Estratificação térmica da atmosfera.....	11
<b>Figura 2</b> - Mapa de localização da cidade de Sete Lagoas - MG.....	17
<b>Figura 3</b> - Esquema do saldo de radiação em relação ao balanço de ondas longas (Boc) e ao balanço de ondas longas (Bol).....	19
<b>Figura 4</b> - Evolução média e total mensal das variáveis (a) umidade relativa do ar, (b) insolação e (c) temperatura média do ar, respectivamente e a normal climatológica de 1991 a 2020 e 1981 a 2010 (INMET), no município de Sete Lagoas – MG.....	22
<b>Figura 5</b> – Evolução média anual das componentes do saldo de radiação na superfície urbana da cidade de Sete Lagoas para as estações do ano para os períodos estudados.....	24
<b>Figura 6</b> – Relação entre os valores médios diários de insolação e radiação solar global para Sete Lagoas – MG, nos meses de janeiro a dezembro, para os períodos de observações estudados.....	28
<b>Figura 7</b> - Comportamento médio mensal de radiação solar global e saldo de radiação para Sete Lagoas – MG, nos períodos de observações estudados.....	30
<b>Figura 8</b> – Comportamento médio mensal do balanço de ondas curtas (Boc) e do balanço de ondas longas (Bol) em relação ao saldo de radiação (Rn) em Sete lagoas – MG, para os períodos de observações estudados.....	32

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	9
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	10
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	10
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	10
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	10
<b>3.1</b>	<b>Atmosfera Terrestre</b> .....	10
<b>3.3</b>	<b>Energia e ambiente</b> .....	12
<b>3.4</b>	<b>Modelos de estimativa do saldo de radiação</b> .....	14
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	16
<b>4.1</b>	<b>Localização e clima</b> .....	16
<b>4.2</b>	<b>Dados utilizados</b> .....	17
<b>4.3</b>	<b>Modelos de estimativa do saldo de radiação</b> .....	18
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	21
<b>5.1</b>	<b>Variáveis meteorológicas</b> .....	21
<b>5.2</b>	<b>Saldo de radiação</b> .....	23
<b>5.3</b>	<b>Radiação solar incidente e insolação</b> .....	25
<b>5.4</b>	<b>Saldo de radiação em relação à radiação solar global</b> .....	29
<b>5.5</b>	<b>Balanco de ondas curtas e balanço de ondas longas</b> .....	31
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	33
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	34



## 1 INTRODUÇÃO

Os gases estufa, como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), desempenham papel importante no balanço de energia global, e quando alterados podem causar mudanças no clima global. Esses gases são liberados principalmente pela queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas intensivas. À medida que esses gases se acumulam na atmosfera, eles formam uma camada que retém o calor do sol, basicamente ondas curtas, e absorvem energia proveniente da superfície da Terra, basicamente ondas longas, causando um aumento da temperatura média da Terra (IPCC, 2013).

Conhecer a disponibilidade de energia de uma região é fundamental para compreensão e análise de todos os processos de troca de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera de determinado local, bem como entender os mecanismos que influenciam o clima, a distribuição de temperatura e até mesmo a formação de nuvens.

O saldo de radiação representa a energia radiante isolada e privativa por um corpo específico ou ecossistema, permitindo a quantificação da radiação disponível para os processos biológicos e físicos nos ecossistemas. Essa energia disponível, da-se da relação entre a entrada e a saída de energia radiante no sistema, com saldo positivo durante o dia, uma vez que a radiação solar de ondas curtas recebidas do Sol excede a quantidade de energia radiante de ondas longas perdidas pela Terra, e saldo negativo durante a noite, pois não há mais energia solar atingindo a superfície do solo, embora a Terra continue emitindo radiação para o espaço sideral. Ressalta-se ainda, que dependendo da superfície do corpo, apenas uma parte da radiação solar incidente é recebida, uma vez que sempre há uma emissão de energia radiante que é refletida devido às propriedades do corpo ou meio.

Ademais, a quantificação da disponibilidade de energia tem proporcionado estudos relevantes no que tange o uso da energia natural, a energia renovável, favorecendo a diversificação da matriz energética. Fontes de energia limpa, como a solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, têm um impacto mínimo no clima e são consideradas sustentáveis a longo prazo. Ao promover a transição para fontes renováveis, podemos diminuir a dependência dos combustíveis fósseis e reduzir significativamente as emissões de gases do efeito estufa (BABU, N. et. al., 2021. BRITO, G. et. al., 2020).

Portanto, o estudo do saldo de radiação, ou seja, conhecer a disponibilidade de energia de uma região, como o município de Sete Lagoas-MG, permite avaliar o impacto das variações na radiação solar incidente e refletida no desenvolvimento das plantas, na evapotranspiração, no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na produtividade agrícola, permitindo e

contribuindo com informações importantes para um manejo mais eficiente e sustentável dos recursos naturais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento sazonal do Saldo de Radiação na cidade de Sete Lagoas – MG.

### **2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO**

- Estimar a radiação solar global incidente, pelo método de Angström-Prèscott;
- Estimar a energia disponível, pelo método do balanço de ondas curtas e ondas longas;

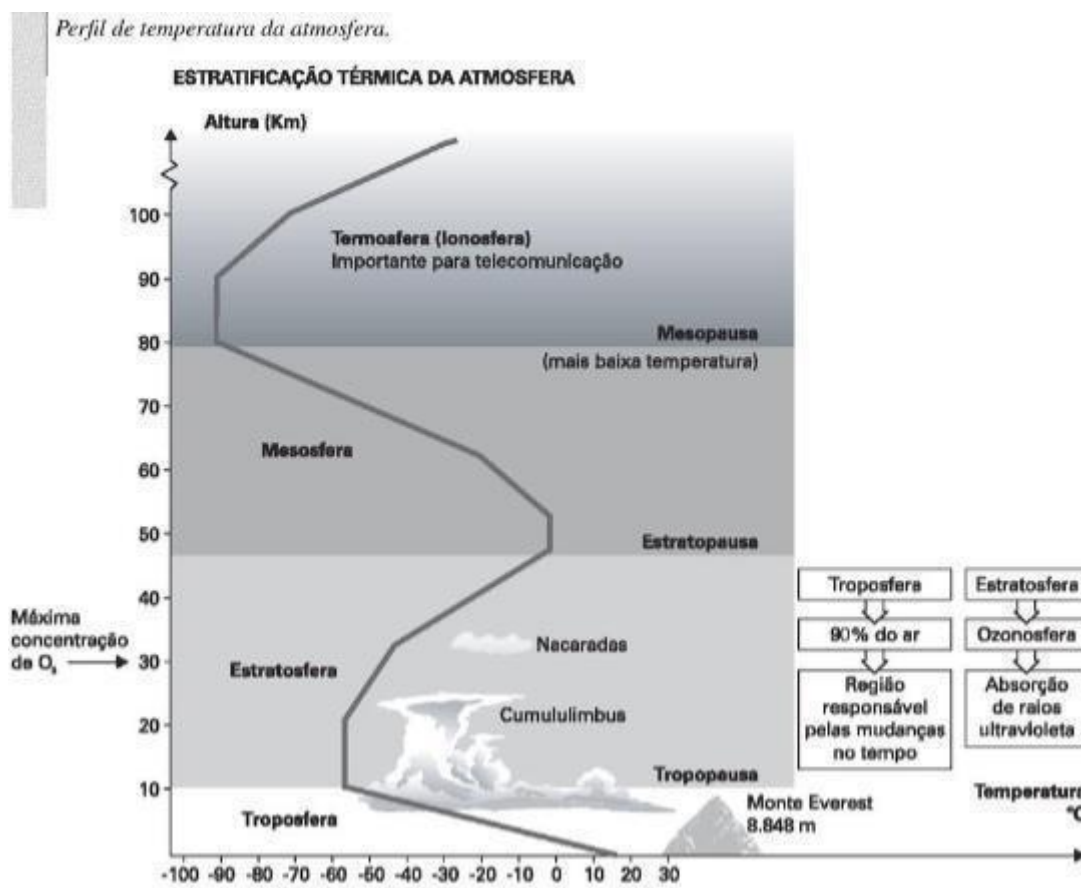
## **3 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 ATMOSFERA TERRESTRE**

A atmosfera terrestre é uma camada fina constituída por gases, partículas que envolvem o planeta Terra. É composta em abundância por Hidrogênio (cerca de 78%) e oxigênio (cerca de 21%), juntamente com traços de outros gases como argônio, dióxido de carbono e vapor de água, entre outros. A atmosfera é dividida em várias camadas à medida que se afasta da superfície da Terra, denominadas de troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. Essas camadas têm características distintas, relacionadas a temperatura, pressão, densidade e composição gasosa (SMITHSON et al., 2020).

A troposfera é a camada mais próxima da superfície terrestre e é onde ocorre a maior parte dos fenômenos meteorológicos, apresentando perfil vertical de temperatura diminuindo com a altitude. A estratosfera fica acima da troposfera e é conhecida por conter a camada de ozônio, que ajuda a proteger a Terra dos raios ultravioleta do Sol. Essa absorção intensa de energia na camada, faz com que ocorra a inversão térmica. A mesosfera é a camada seguinte e é caracterizada por temperaturas bem pequenas. A termosfera é uma camada superior, onde a temperatura aumenta significativamente devido à absorção de radiação solar. Por fim, a exosfera é a camada mais externa da atmosfera, já em contato com o espaço, as poucas moléculas gasosas escapam gradualmente no espaço (SEIDEL et al., 2012).

Figura 1 – Estratificação térmica da atmosfera.



Fonte: Braga et al. (2005)

A atmosfera desempenha um papel fundamental na proteção e suporte à vida na Terra. Ela atua como um escudo protetor contra radiações nocivas do espaço, como raios ultravioleta, raios X e partículas carregadas. Além disso, a atmosfera é essencial para a regulação térmica do planeta, absorvendo a radiação solar e retendo o calor, o que mantém a temperatura adequada para a vida. A atmosfera também está envolvida nos processos de circulação de gerar, calor e transporte de umidade, influenciando o clima e os padrões globais (IPCC, 2013).

A poluição atmosférica e as mudanças climáticas são desafios que experimentaram a atmosfera terrestre. A emissão de gases poluentes, como óxidos de carbono, enxofre, nitrogênio e material particulado provenientes de atividades humanas, contribuem para o aumento do efeito estufa e consequentemente o aumento da temperatura global. Esses processos têm efeitos diretos no clima, incluindo o aumento da temperatura média da Terra e alterações nos padrões climáticos. Além disso, os poluentes do ar afetam a qualidade do ar

que respiramos, com consequências para a saúde humana e ecossistemas (STOCKER et al., 2014).

Em resumo, a atmosfera terrestre é uma camada de gases essenciais que envolvem nosso planeta, proporcionando proteção, regulação térmica e suporte à vida. No entanto, as atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa, representam desafios extraordinários para a saúde da atmosfera e o equilíbrio climático global (SMITHSON et al., 2020; STOCKER et al., 2014; IPCC, 2013; SEIDEL et al., 2012).

### **3.2 ENERGIA E AMBIENTE**

A energia desempenha um papel fundamental no desenvolvimento humano e no funcionamento da sociedade moderna. No entanto, a geração e o consumo de energia também têm influências no meio ambiente. A busca por soluções energéticas mais limpas e ecológicas é essencial para garantir a preservação do meio ambiente e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (IPCC, 2013).

De acordo com o Relatório Especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2018, intitulado "Aquecimento Global de 1,5 °C", o setor energético é responsável por cerca de 73% das emissões de gases poluentes de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionados à atividade humana. Essas emissões resultam principalmente da queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, para a geração de eletricidade e fornecimento de energia para transporte, indústria e residências.

Para enfrentar esse desafio, as energias renováveis têm se tornado cada vez mais importantes. Segundo a Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), a participação das energias renováveis na matriz energética global aumentou para cerca de 26% em 2020. As fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, possuem emissões de carbono e são inesgotáveis, tornando-se alternativas viáveis e sustentáveis aos combustíveis fósseis.

A energia solar é uma das formas de energia renovável com maior potencial para contribuir para a redução das emissões de carbono e transição para uma economia de baixo carbono. De acordo com o Relatório de Tendências Globais em Energia Renovável 2021 da IRENA, a capacidade instalada de energia solar aumentou 18% em 2020, alcançando 714 gigawatts (GW) em todo o mundo. Além disso, a energia solar fotovoltaica está se tornando cada vez mais acessível, graças aos avanços tecnológicos e à redução dos custos de instalação.

Um estudo conduzido por Babu et al. (2021) analisou o desempenho de sistemas fotovoltaicos residenciais instalados em diferentes regiões climáticas. Os resultados mostraram que o rendimento energético dos sistemas fotovoltaicos residenciais variava de acordo com a localização geográfica, com diferenças significativas em diferentes estações do ano. Esse estudo destacou a importância de considerar os fatores climáticos na instalação e dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos residenciais.

Um estudo de caso conduzido por Louwen et. al. (2016) analisou o desempenho de sistemas fotovoltaicos residenciais em regiões urbanas densamente povoadas. Os resultados mostraram que, mesmo em áreas urbanas com sombreamento parcial de edifícios e obstáculos, a energia fotovoltaica residencial ainda podia ser uma opção viável. Estratégias de projeto e posicionamento adequado dos painéis solares foram identificados como importantes para otimizar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos residenciais em áreas urbanas.

A energia fotovoltaica também tem sido amplamente estudada e aplicada no setor industrial, incluindo a região de Minas Gerais, que possui uma forte área industrial e recursos solares favoráveis. Brito et al. (2020) avaliou a viabilidade econômica da implantação de sistemas fotovoltaicos em empresas do setor industrial em Minas Gerais. Os resultados ilustram que a adoção da energia fotovoltaica poderia proporcionar uma redução significativa nos custos de eletricidade para as indústrias, além de oferecer benefícios ambientais. Os pesquisadores destacaram a importância de incentivos e políticas adequadas para promover a implementação de sistemas fotovoltaicos no setor industrial.

Um estudo de caso realizado por Guerra et al. (2017) analisou a integração de sistemas fotovoltaicos com baterias em uma indústria de laticínios em Minas Gerais. Os resultados mostraram que a combinação de energia solar fotovoltaica com armazenamento de energia permitiu um maior controle do consumo energético, redução de picos de demanda e aumento da autonomia energética da empresa. Isso resultou em benefícios econômicos e maior resiliência do sistema energético.

A energia fotovoltaica é de suma importância devido ao seu caráter limpo e renovável, oferecendo uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis. Seu uso generalizado pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mitigar as mudanças climáticas e promover a independência energética. Além disso, a adoção da energia fotovoltaica tem implicações econômicas positivas, como a criação de empregos verdes e a redução dos custos de eletricidade a longo prazo.

### 3.3 MODELOS DE ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO

É frequente utilizar modelos para estimar o equilíbrio da radiação ( $R_n$ ) quando não é possível mensurar essa variável. Esses tipos de modelos, em geral, consistem em duas partes, uma relação empregada para o equilíbrio das ondas curtas ( $B_{oc}$ ) e outra para o equilíbrio das ondas longas ( $B_{ol}$ ). O equilíbrio das ondas corresponde à diferença entre a radiação solar incidente e refletida por uma superfície específica (albedo). Enquanto isso, o equilíbrio das ondas longas corresponde à diferença entre a energia sentida e irradiada pela superfície terrestre (ALLEN et al., 1997).

Schoffe, et. al. (1999) estimaram a radiação líquida disponível durante o período primavera-verão na região de Jaboticabal (SP). Os resultados obtidos revelaram que as variáveis  $Q_o$ ,  $t$ , e  $n/N$  não foram suficientes para retratar completamente o comportamento da  $R_n$ . Entretanto, foi constatado que a  $R_n$  pode ser estimada para a região de Jaboticabal durante o período primavera-verão, por meio da utilização da equação de Penman ou da equação de regressão  $R_n = -0,1095 + 0,625 R_s$ , com  $R^2 = 0,97$ , sendo imprescindível, em ambos os casos, o emprego da radiação solar global medida localmente.

Outra pesquisa conduzida por Callejas, et. al. (2016) avaliou as interações entre a superfície e a atmosfera em uma área urbana situada nas proximidades da região central de Cuiabá. Os resultados analisados indicaram que as frações de particionamento do fluxo de calor antropogênico, do calor armazenado no dossel urbano, do fluxo de calor latente e do fluxo de calor sensível em relação à energia disponível no ambiente, durante as estações seca e úmida, foram aproximadamente de 3%, 26%, 28% e 46%, e 3%, 23%, 31% e 46%, respectivamente.

Comparativamente, esses valores foram semelhantes aos observados na cidade de Miami, na Flórida, embora tenham diferido em relação ao momento do pico e à intensidade. Os índices médios diurnos da razão de Bowen ( $\beta$ ) foram de 1,67 na estação seca e 1,55 na estação chuvosa, apresentando correlação direta com a área de cobertura vegetal. Além disso, foi observado que os fluxos de calor sensível e latente se correlacionaram positivamente, respectivamente, com a superfície impermeável e a vegetada (CALLEJAS, et. al., 2016).

Em relação ao resultado de saldo de radiação foi possível observar que os valores máximos diurnos em média ocorreram às 12h, com uma intensidade de  $450 \text{ W m}^{-2}$  durante o período seco, e às 11h30min, com uma intensidade de  $510,2 \text{ W m}^{-2}$  no período chuvoso. Em relação aos valores médios noturnos, foram registrados  $-83,0 \text{ W m}^{-2}$  durante o período seco às 18h, e  $-71,3 \text{ W m}^{-2}$  no período chuvoso, às 19h.

Ferreira, et. al. (2004), determinaram a evolução sazonal das diferentes componentes do balanço de energia na superfície urbana da cidade de São Paulo. Neste estudo, os valores médios diários baseados na evolução diurna média mensal do saldo de radiação para a cidade de São Paulo durante o mês de agosto de 2004 (Inverno) foi de  $19,26 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e os valores diários médios mensais do saldo da radiação na superfície para a cidade de São Paulo no verão (Fevereiro) e inverno (Agosto) de 2004 foram de  $14,37$  e  $10,18 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Um outro trabalho relevante foi realizado por Lopes Junior, et. al. (2023) que estudaram a variação horária e decendial do balanço de radiação da Cana-de-Açúcar na Região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas, Brasil, durante o período de de novembro de 2017 a setembro de 2018. Os resultados mostraram que os fluxos radiativos dos balanços de ondas curtas e longas apresentaram variações significativas devido a fatores como dinâmica das nuvens/precipitação, sazonalidade e índice de cobertura do solo (tamanho da cultura). A radiação de onda longa emitida pela superfície apresentou uma tendência decrescente ao longo do período experimental, enquanto a radiação refletida se manteve constante com o crescimento da cultura. O balanço de radiação ( $R_n$ ) foi dominado pelo balanço de ondas curtas, mas também mostrou variações sazonais, com valores mais altos durante a estação seca e mais baixos na estação chuvosa. Na estação chuvosa os valores médios máximo e mínimo de  $R_n$  foram de  $495,37 \text{ W m}^{-2}$  e  $-42,10 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente, com média de  $131,96 \text{ W m}^{-2}$ . Para a estação seca foram encontrados os valores médios mais elevados de  $R_n$ ,  $615,43 \text{ W m}^{-2}$  e  $-58,65 \text{ W m}^{-2}$  respectivamente, com média de  $155,29 \text{ W m}^{-2}$ .

Crews, et. al. (2017) estudaram a análise comparativa de modelos matemáticos para estimativas do saldo de radiação em áreas de pastagens. A pesquisa envolveu duas etapas: a determinação dos parâmetros de ajuste, utilizando dados do ano de 2011, e, em seguida, a aplicação desses parâmetros para estimar os resultados dos anos de 2012 a 2015. De maneira geral, durante a fase de calibração dos parâmetros, os quatro modelos demonstraram um desempenho satisfatório. Entretanto, na fase de validação, os resultados foram distintos. O modelo proposto por Iziomon obteve o quarto melhor desempenho, enquanto os modelos propostos por Fietz e Fisch mostraram resultados bastante similares, ocupando a segunda e terceira posição, respectivamente.

Por outro lado, o modelo proposto pela FAO apresentou o melhor desempenho durante o período de validação dos modelos. Os valores médios do saldo de radiação apresentaram um crescimento ao longo dos anos, com o menor valor de  $10,8 \text{ W/m}^2$ , no ano de 2011, e de  $12,88 \text{ W/m}^2$ , no ano de 2015. O valor máximo do período foi observado no ano de 2014, onde atingiu  $18,93 \text{ W/m}^2$  e a menor no ano de 2012, atingindo  $1,13 \text{ W/m}^2$  (CREWS, et. al., 2017).

Gusmão, et. al. (2012) estudaram a determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, Utilizando Imagens Orbitais de satélite, do sensor TM-Landsat 5 e posteriormente foram gerados mapas do saldo de radiação instantâneo e diário, utilizando o algoritmo SEBAL. Os resultados mostraram que o saldo de radiação instantâneo médio variou entre 488 e 535 W m<sup>-2</sup>, enquanto a variação espacial do saldo de radiação diário médio ficou entre 132,7 e 145,3 W m<sup>-2</sup>. Foi observada uma redução no saldo radiativo nas áreas antrópicas. A avaliação da acurácia dos dados foi feita através do Erro Médio Relativo, Médio Absoluto e da Raiz do Erro Quadrático Médio, associados ao Rn,24h. Os valores obtidos foram de 1,95%, 2,78 W m<sup>-2</sup> e 3,36 W m<sup>-2</sup>, respectivamente. Esses resultados destacam a importância e eficácia da técnica empregada, com uma precisão satisfatória na determinação do saldo de radiação utilizando apenas imagens de sensoriamento remoto.

Contes, et. al. (2022) avaliaram cinco modelos de estimativa do saldo de radiação diário para o município de Botucatu, São Paulo, baseados em medições meteorológicas e um modelo de sensoriamento remoto. Os modelos avaliados foram os seguintes: Linacre (1968), Doorenbos e Pruitt (1977), Funari, Tarifa e Simpson (1985), Allen et al. (1998) e Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998), assim como também o GLDAS-2.1 para comparação. Os resultados da avaliação indicaram que o modelo de Allen et al. (1998), recomendado pela FAO/UN, apresentou a melhor correlação geral (R: 97%) e os menores erros (rMBE: 9,54% e rRMSE: 13,66%), quando comparado com as medições. De forma sazonal, o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) obteve resultados satisfatórios para o verão (R: 95%; rMBE: 8,04% e rRMSE: 18,55%), inverno (R: 94%; rMBE: 8,04% e rRMSE: 18,55%) e outono (R: 96,50%; rMBE: 2,62% e rRMSE: 9,42%). Já para a primavera, o modelo de Allen et al. (1998) apresentou os melhores resultados (R: 94%; rMBE: 8,27% e rRMSE: 10,28%).

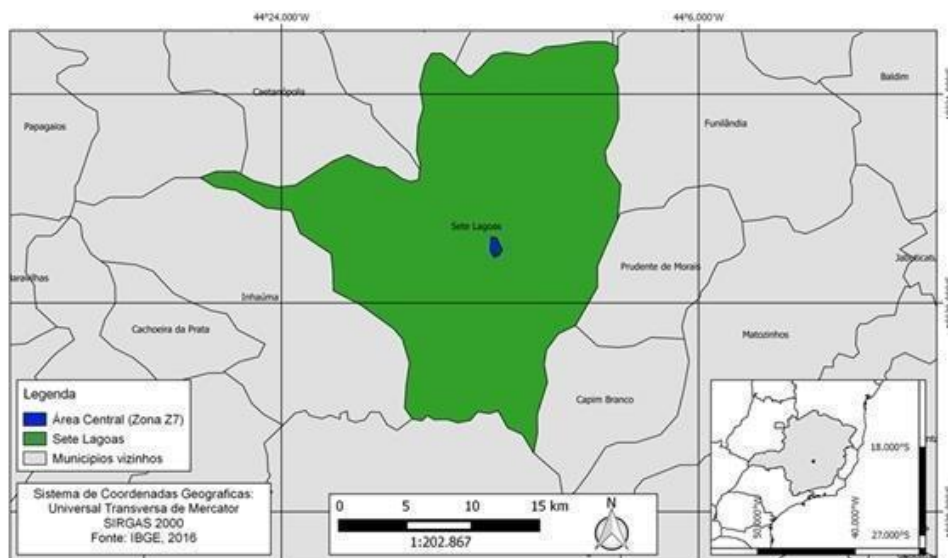
## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 LOCALIZAÇÃO E CLIMA**

O município de Sete Lagoas está localizado no estado de Minas Gerais, Brasil. Situado a aproximadamente 112 km a noroeste da capital do estado, Belo Horizonte. A cidade está situada em uma região de transição entre o Cerrado e a Mata Atlântica, conhecida como "Cerrado Mineiro".



Figura 2 - Mapa de Localização da cidade de Sete Lagoa-MG



Fonte:[https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Mapa-de-Localizacao-da-cidade-de-Sete-Lagoa-MG-Figure-1-Location-map-of-Sete\\_fig1\\_324278870](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Mapa-de-Localizacao-da-cidade-de-Sete-Lagoa-MG-Figure-1-Location-map-of-Sete_fig1_324278870)

Em relação ao clima, Sete Lagoas possui um clima tropical de altitude. No verão, que ocorre de dezembro a março, a temperatura média varia entre 20°C e 30°C, com picos que podem chegar a 35°C. Durante o inverno, que vai de junho a setembro, as temperaturas são mais amenas, com mínimas que variam entre 10°C e 15°C e máximas em torno de 25°C. No outono e na primavera, as temperaturas são moderadas, com médias em torno de 20°C.

A cidade de Sete Lagoas também possui um regime de chuvas bem definido. O período chuvoso ocorre principalmente durante a primavera e o verão, com maior intensidade entre outubro e março. Nesses meses, é comum ocorrerem pancadas de chuva intensas, seguidas de trovoadas. Durante o outono e o inverno, as chuvas são menos frequentes.

#### 4.2 DADOS UTILIZADOS

Os dados aplicados foram adquiridos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram selecionados 3 períodos de dados contínuos. Isso, devido as grandes falhas encontradas no banco de dados, os quais não foram preenchidos neste estudo, sendo eles:

- De 1961 a 1982 (21 anos);
- De 1993 a 2015 (22 anos);

(Ambos obtidos pela estação meteorológica convencional instalada a latitude 19°29'S, longitude 44°10'W; altitude 753,68 m; código da estação: 83585).

- De 2016 a 2022 (6 anos);

(Período esse obtido pela estação meteorológica automática instalada a latitude 19°27' S, longitude 44°10' W; altitude 719 m; código da estação: A569).

Atualmente a estação meteorológica convencional se encontra desinstalada e a estação meteorológica automática se encontra em operação.

Foram obtidas as seguintes variáveis ambientais da estação meteorológica convencional: temperatura média compensada (T), insolação (n), umidade média relativa do ar (UR). E para a estação meteorológica automática foram obtidas as seguintes variáveis ambientais: temperatura média compensada (T), umidade média relativa do ar (UR) e radiação global (Rg). Em função de algumas ausências de dados ao longo dos períodos analisados, fez-se necessário o preenchimento de falhas dos dados. Para tal, foram utilizadas a média móvel de até três dias consecutivos para o preenchimento de falha dos dados.

Para a radiação solar (Rg) foi necessário calcular a média diária a partir dos dados horários e posteriormente calculou-se a média mensal a partir da média diária. Além disso, para a umidade relativa do ar foi necessário calcular a média mensal a partir da média diária. Para as demais variáveis obteve-se dados mensais disponíveis no BDMEP.

Posteriormente, os dados foram organizados no software Microsoft Office Excel 2016, no qual foram utilizadas as funções matemáticas, trigonométricas, lógica e de classificação, como filtro e subtotais de dados, para obtenção dos resultados.

### **4.3 MODELO DE ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO**

No presente trabalho o método de estimativa do saldo de radiação foi obtido pelas seguintes equações:

O saldo de radiação é a soma do balanço de ondas curtas (Boc) que é emitido pelo Sol e sofre ou não modificações, com o balanço de ondas longas (Bol) que é emitido pela Terra.

$$Rn = Boc + Bol$$

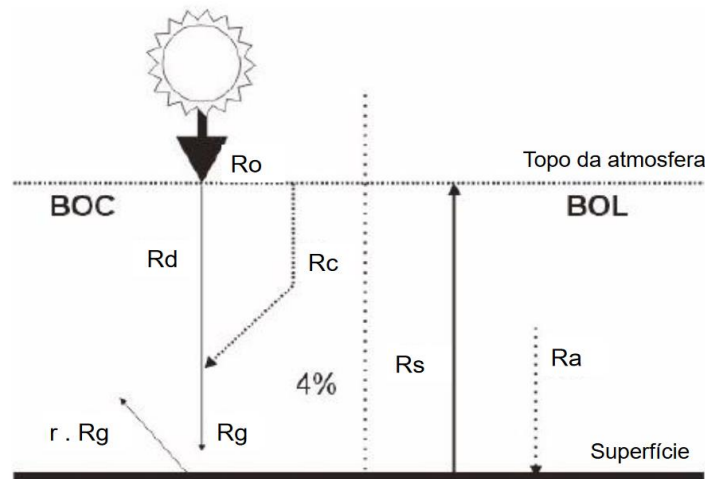
em que,

Rn = Radiação líquida;

Boc = Balanço de ondas curtas;

Bol = Balanço de ondas longas

Figura 3 - Esquema do saldo de radiação em relação ao balanço de ondas longas (Boc) e ao balanço de ondas longas (Bol).



Fonte: <https://agronomiaicesp.files.wordpress.com/2019/09/04-balanco-radiacao.pdf>

A radiação global ( $R_g$ ) é a soma dos fluxos de radiação solar direta ( $R_d$ ) e fluxo de radiação solar difusa ( $R_c$ ) que atingem a superfície terrestre simultaneamente.

$$R_g = R_d + R_c$$

em que,

Radiação solar direta ( $R_d$ ): atinge diretamente a superfície da Terra sem ser interceptada por nuvens ou espalhada pela atmosfera.

Radiação solar difusa ( $R_c$ ): espalhada na atmosfera, sofrendo vários desvios no seu percurso (maior incidência em dias nublados).

Para estimar a radiação solar global ( $Q_g$ ) baseado na insolação diária, segundo Angström-Prèscott usa-se a seguinte equação:

$$R_g = R_o[(a) + b.n/N]$$

em que,

a, b: coeficientes adimensionais, obtidos por análise de regressão linear, para cada local e segundo Ferreira (2008) para a cidade de Sete Lagoas -mg os valores são:  $a= 0,283$  e  $b=0,451$ .

$R_o$  = radiação solar em uma superfície horizontal no topo da atmosfera;

$n$  = insolação diária (obtida em registros do heliógrafo) ;

$N$  = duração astronômica do dia (fotoperíodo).

Onde a radiação solar em uma superfície horizontal no topo da atmosfera é calculada pela seguinte equação:

$$R_o = 37,60 dr \left( \frac{Hr}{180} \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}H \right), MJ m^{-2} d^{-1}$$

em que,

$R_o$  - radiação solar no topo da atmosfera;

$H$  – ângulo horário do nascer ao por do sol (graus);

$\phi$ - latitude (graus);

$\delta$ – declinação solar (graus);

$DJ$  - dia juliano: número de dias transcorridos desde o dia 1o de janeiro;

$dr$  - distância relativa Terra Sol estimada por

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} DJ\right)$$

No balanço de radiação de ondas curtas a radiação que atinge a Terra, parte é refletida, em razão do albedo ( $r$ ) e devolvida para o espaço, podendo ser estimado pela seguinte equação:

$$Boc = (1 - r) \cdot Rg$$

Em que,

$Rg$  = radiação solar global ou solar incidente ( $MJ m^{-2} d^{-1}$  );

$r$  = valor tabelado que corresponde ao poder refletor da superfície

(albedo), no qual neste trabalho foi utilizado 0,23 (superfície gramada).

A radiação de ondas longas é a diferença entre a contra-radiação da atmosfera ( $R_a$ ) e a radiação emitida pela Terra ( $R_s$ ).

$$Bol = R_a - R_s$$

Onde a emissão efetiva da Terra pode ser estimada pela seguinte equação de Brunt-Penman (1948):

$$Bol = \sigma T^4 (0,09\sqrt{e} - 0,56) (0,1 + 0,9 \frac{n}{N})$$

em que,

Bol - balanço de radiação de ondas longas ou emissão efetiva terrestre ( $MJ/m^2 \cdot dia$ );

e - pressão atual do vapor d'água (mmHg). Sabe-se que a pressão no nível médio do mar (PNMM) = 1013,25 hPa ou 101,325 kPa, e que 1atm tem 760 mmHg, logo tem-se a relação: 1013,25 hPa ou 101,325=760 mmHg = 760 mmHg

$\sigma$  - constante de Stefan–Boltzmann,  $4,903 \times 10^{-9} MJ m^{-2} d^{-1} K^{-4}$ ;

T - temperatura média diária absoluta do ar (K);

n/N – razão de insolação média

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

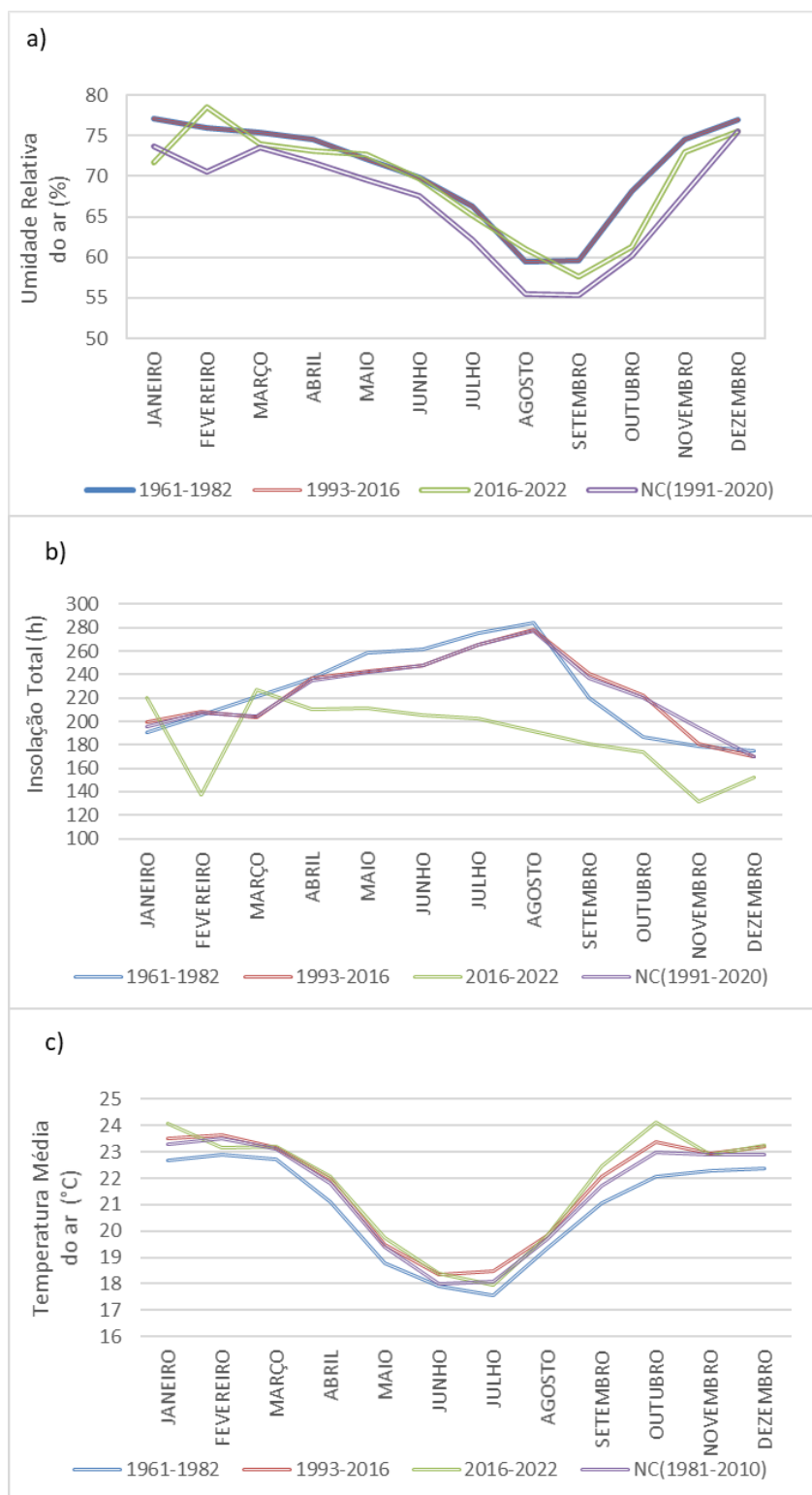
### 5.1 VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

A umidade do ar, insolação e temperatura do ar são variáveis inter relacionadas que afetam o saldo de radiação. A umidade atmosférica pode absorver parte da radiação solar, enquanto a insolação determina a quantidade de radiação solar direta que atinge a superfície. Por fim, a temperatura da superfície influencia a quantidade de radiação térmica emitida. A Figura 4 dispõe dos totais mensais acumulados na área experimental para as variáveis temperatura do ar, umidade do ar e insolação, comparados a normal climatológica de 1981 a 2010 e 1991 a 2020 (INMET), respectivamente,

Nas Figuras (4a e 4c) é possível notar que os valores observados das variáveis de umidade e temperatura do ar estão próximos das médias da normal climatológica. Isso indica que as condições atuais estão dentro dos padrões esperados para cada época do ano.

Na Figura (4b) a insolação apresentou semelhança à normal climatológica nos períodos de 1961 a 1982 e 1993 a 2015, conforme observado pelas medições da estação meteorológica convencional. No entanto, no período de 2016 a 2022, verifica-se que a insolação está abaixo da normal climatológica, indicando uma redução na quantidade de luz solar direta recebida. Essa diminuição na insolação pode estar relacionada ao menor número de dados estudados, em média 7 anos de observações monitoradas até o momento.

Figura 4- Evolução média e total mensal das variáveis (a) umidade relativa do ar, (b) insolação e (c) temperatura média do ar, respectivamente, e a normal climatológica de 1991 a 2020 e 1981 a 2010 (INMET), no município de Sete Lagoas - MG.



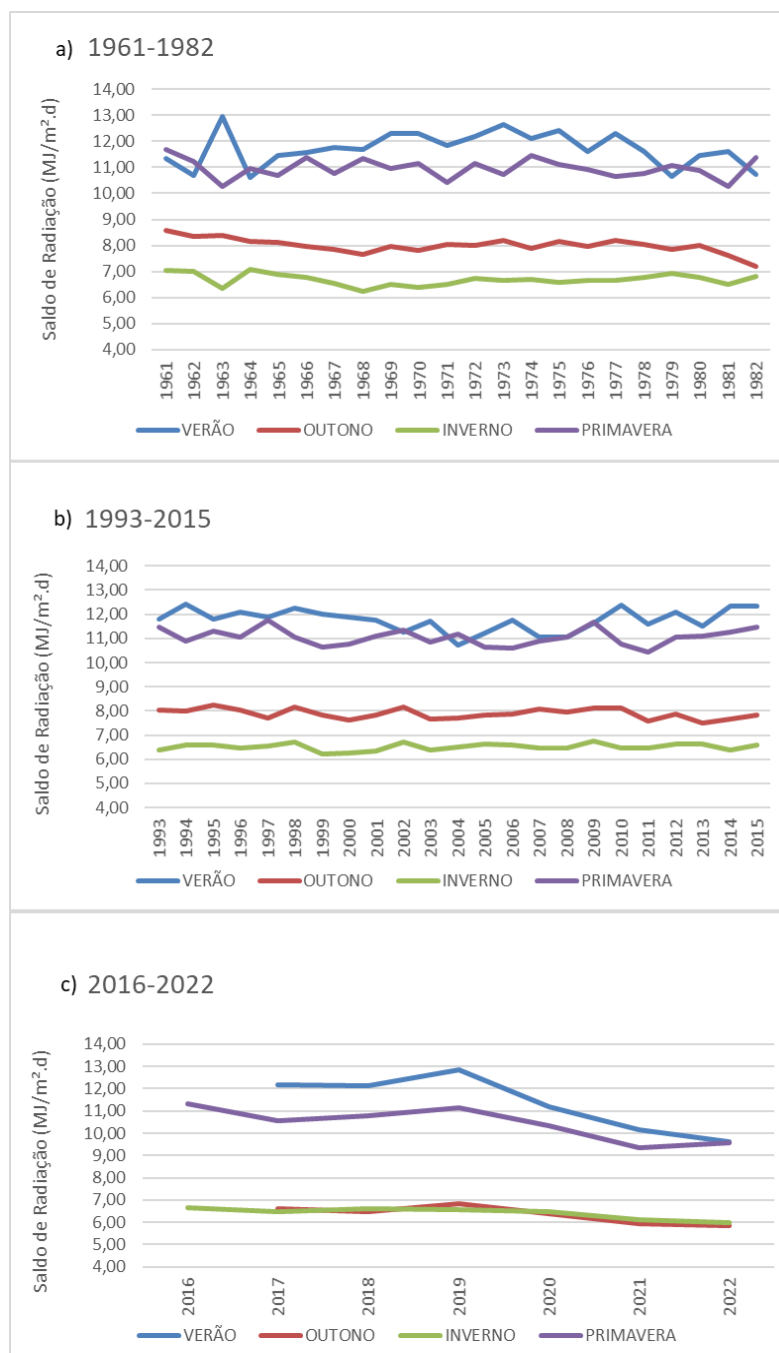
## 5.2 SALDO DE RADIAÇÃO

Na Figura 5, é possível observar uma semelhança no comportamento da intensidade do saldo de radiação entre os períodos de verão e primavera, assim como entre inverno e outono. No período de 1961 a 1982 ( Figura 5a) mostra uma variação mais pronunciada ao longo do ano, com um aumento significativo na intensidade do saldo de radiação durante o verão de 1963, atingindo valor máximo de  $12,97 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e mínimo de  $10,61 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  nos anos de 1964 e 1981. Já na primavera, há uma variação menos acentuada ao longo do ano, com a intensidade máxima do saldo de radiação de  $11,69 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1961 e mínima de  $10,25 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1963. Nas estações do outono e inverno, observa-se valores máximos do saldo de radiação de  $8,59 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1961,  $7,10$  em 1964 e valores mínimos de  $7,19 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1982 e  $6,24 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1968, respectivamente.

No período de 1993 a 2015, a Figura 5b apresenta grande semelhança com o comportamento descrito na Figura 5a, exibindo os valores máximos e mínimos do saldo de radiação para as quatro estações e seus respectivos anos. No verão e primavera, foram observados intensidades máximas de  $12,42 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1994, de  $11, \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1997 e mínimas de  $11,04 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2008 e de  $10,45 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2011, respectivamente. No inverno e outono, foi observada uma variação de comportamento praticamente semelhante para ambas. No outono, a intensidade máxima do saldo de radiação foi de  $8,22 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1995 e mínima de  $7,50 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2013. Já no inverno, foi registrada uma intensidade máxima de  $6,74 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2009, e uma intensidade mínima de  $6,21 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 1999 (Figura 5b).

No período de 2016 a 2022, observa-se uma variação significativa na intensidade do saldo de radiação ao longo do ano. Devido à falta de dados nos meses de janeiro a maio, as estações de verão e outono de 2016, não foram contempladas no período analisado. No verão, a intensidade máxima do saldo de radiação foi de  $12,83 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  no ano de 2019, enquanto a intensidade mínima foi de  $9,61 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Na primavera, a intensidade máxima foi de  $11,35 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  no ano de 2016, e a mínima foi de  $9,36 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  no ano de 2021. Já no outono e inverno, as intensidades máximas foram de  $6,83 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2019 e  $6,66 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2016, e as mínimas de  $5,86$  e  $5,96 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em 2022, respectivamente (Figura 5c).

Figura 5 - Evolução média anual das componentes do saldo de radiação na superfície urbana da cidade de Sete Lagoas para as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) para os períodos de: (a) 1961 a 1982, (b) 1993 a 2015 e (c) 2016 a 2022.



Portanto, é possível observar que a variação média do saldo de radiação nos períodos estudados de 1961 a 1982 e 1993 a 2015 e 2016 a 2022, para as estações do ano o verão,



inverno, primavera e outono, corresponderam ao comportamento satisfatória e sazonal do equilíbrio de radiação.

Conforme um estudo feito por Ferreira, et. al. (2004), para a cidade de São Paulo no verão (Fevereiro) e inverno (Agosto) de 2004 foram de 14,37 e 10,18 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. Neste estudo obteve-se uma média mensal de fevereiro (verão) nos períodos estudados de 1961 a 1982 e 1993 a 2015 e 2016 a 2022, respectivamente de 11,68, 11,69 e 10,62 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. Além disso, para agosto (inverno) mediu-se um saldo de radiação de 8,47, 8,19 e 7,91 MJ m<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>. Devido a isso conclui-se que para os períodos estudados neste trabalho teve sua estimativa do saldo de radiação um pouco menor que a estimativa feita pelo autor mencionado acima. Essa diferença pode ser atribuída a diversos fatores, como possíveis diferenças nas metodologias utilizadas para estimar a radiação, localização específica dos pontos de medição, bem como a inclusão de dados de períodos diferentes. Portanto, os resultados deste trabalho são consistentes com os dados apresentados.

### **5.3 RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E INSOLAÇÃO**

A radiação solar global e a insolação estão diretamente relacionadas, pois ambas determinam a quantidade de energia solar recebida em determinado local (Figura 6). A radiação solar global refere-se à quantidade total de radiação solar que atinge a superfície da Terra em um determinado local durante um período específico. Essa radiação inclui a componente direta do sol, que é a radiação que chega diretamente do sol em um ângulo perpendicular à superfície, e também a componente difusa, que é a radiação dispersa pela atmosfera. A insolação, por sua vez, é a quantidade de tempo em que a radiação solar atinge a superfície da Terra em um determinado local durante um período específico, geralmente expresso em horas. Ela representa a duração ou o tempo de exposição à radiação solar.

Na Figura 6, pode-se observar a forte correlação entre as duas variáveis para todos os períodos estudados (Figura 6a, 6b e 6c).

Durante o período de 1961 a 1982, conforme representado na Figura (6a), podemos observar que a relação entre as variáveis  $x$  e  $y$  é descrita por  $y = 2,5382x$ . O valor do coeficiente de inclinação ( $R^2$ ) é de 0,95, o que indica um ajuste muito bom da reta " $y = 2,5382x$ " aos dados do gráfico de distribuição. Aproximadamente 95% da variabilidade dos valores de  $y$  pode ser explicada por essa prescrição linear. Em outras palavras, a relação linear

entre x e y é bem ajustada pela permissão fornecida. Quanto mais próximo de 1 para o valor de  $R^2$ , melhor é o ajuste do modelo aos dados.

Durante o período de 1983 a 2015, conforme apresentado na Figura (6b), podemos observar uma relação linear entre x e y, expressa por  $y = 2,5764x$ . O valor do coeficiente angular ( $R^2$ ) é de 0,96, o que indica um ajuste muito bom da reta " $y = 2,5764x$ " aos dados do gráfico de distribuição. Cerca de 96% da variabilidade dos valores de y pode ser explicada por essa aprovação linear. Em outras palavras, a relação linear entre x e y é bem ajustada pela permissão fornecida. Quanto mais próximo de 1 para o valor de  $R^2$ , melhor é o ajuste do modelo aos dados.

No período de 2016 a 2022, ilustrado na Figura (6c), podemos observar que há uma relação linear entre x e y, demonstrada pela aprovação  $= 2,78824x$ . O coeficiente de influência ( $R^2$ ) é de 0,95, indicando que a reta " $y = 2,78824x$ " se ajusta muito bem aos dados do gráfico de dispersão. Aproximadamente 95% da variabilidade dos valores de y pode ser explicada por essa prescrição linear. Em outras palavras, a relação linear entre x e y é bem ajustada pela permissão fornecida. Quanto mais próximo de 1 para o valor de  $R^2$ , melhor é o ajuste do modelo aos dados.

Esses resultados indicam que, ao longo dos três períodos mencionados, a relação entre as variáveis x e y pode ser modelada por uma função linear, com um bom ajuste aos dados representados nos gráficos de distribuição.

Segundo Schoffe, et. al. (1999) em pesquisas que relacionam radiação líquida e radiação solar global, é comum encontrar coeficientes de determinação ( $R^2$ ) que são frequentemente superiores a 0,9, como foi relatado por diversos estudos (FERREIRA (2008), CREWS, et. al.(2017), CONTES, et. al., (2022) ). Esse mesmo autor encontrou um  $R^2=0,97$ .

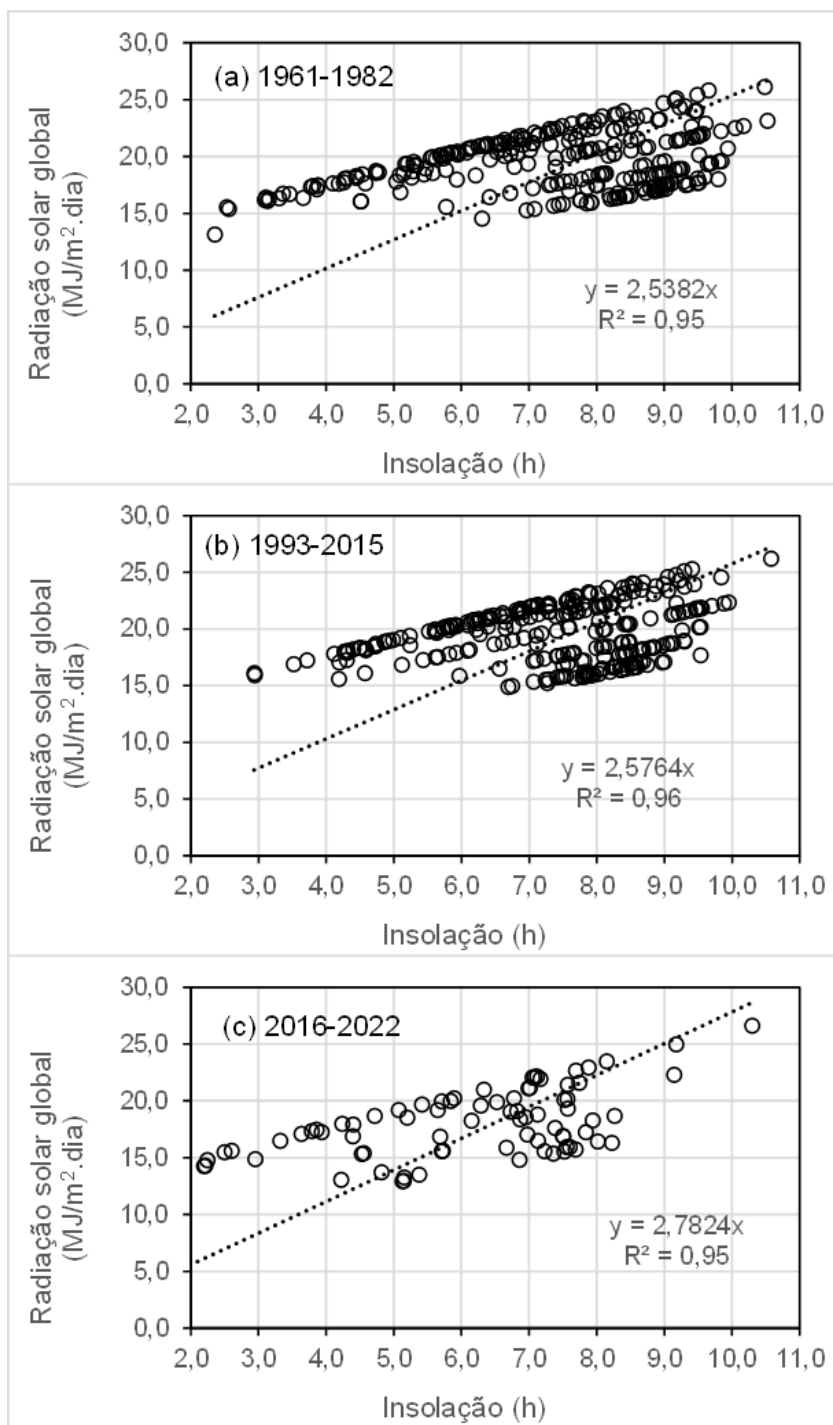
Isso indica que a relação entre a radiação líquida e a radiação solar global nos estudos possui uma alta proporção de variação explicada pelo modelo, sendo o  $R^2$  um indicativo da qualidade do ajuste da regressão linear ou não linear entre as variáveis analisadas. Valores de  $R^2$  superiores a 0,9 sugerem que as duas variáveis possuem uma forte correlação, o que é importante para entender o papel da radiação solar na determinação do saldo de radiação.

A radiação solar global afeta a insolação, pois a quantidade de radiação solar recebida em um determinado local determina a quantidade de energia disponível para aquecer a superfície terrestre e a atmosfera. Quanto maior a radiação solar global, maior a quantidade

de energia disponível e, portanto, maior a insolação, ou seja, mais horas de exposição à radiação solar.

Esses resultados indicam que no verão há uma maior intensidade da radiação solar global, enquanto no outono e inverno ocorre uma menor intensidade. Isso se deve ao fato de que no verão os dias são mais longos e o ângulo de incidência solar é mais direto em relação à superfície terrestre. Além disso, segundo Ferreira, 2008 que realizou um estudo da estimativa da radiação solar global diária em Sete Lagoas, MG baseada em dados de insolação verificou-se que a fórmula de Ångström tem a tendência de subestimar a radiação solar global ( $R_g$ ) em dias totalmente nublados e subestimá-la em dias de céu completamente claro. Esse padrão é observado na maioria das estimativas realizadas com o modelo de Ångström. Ademais, nota-se que os valores médios de exposição solar foram, em média, 64% menores do que os valores médios máximos possíveis de exposição solar, alcançando o maior percentual durante o inverno. No que se refere à radiação global, constata-se que ela pode ser reduzida em cerca de 55% durante o verão, ao atravessar a atmosfera. A distribuição da frequência de ocorrência de exposição solar é semelhante entre as estações do verão e da primavera, assim como entre o inverno e o outono.

Figura 6 - Relação entre os valores médios diários de insolação (n, em h dia<sup>-1</sup>) e radiação solar global (Rg, em MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) para Sete Lagoas, MG, nos meses de janeiro a dezembro, para os períodos de observações estudados: (a) 1961 a 1982, (b) 1993 a 2015 e (c) 2016 a 2022.



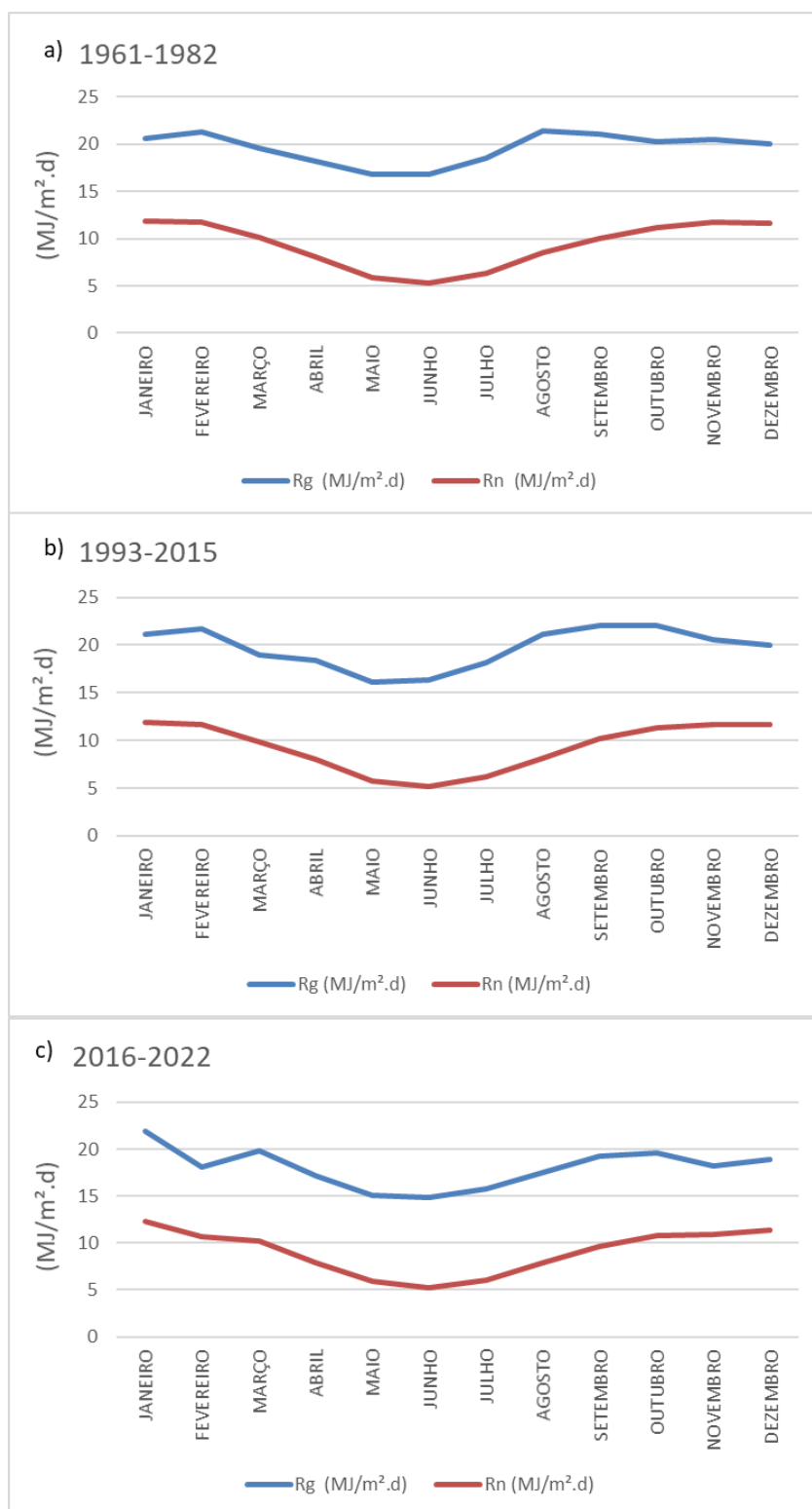
#### 5.4 SALDO DE RADIAÇÃO EM RELAÇÃO A RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Observa-se na Figura 7, o comportamento da média mensal da radiação solar global e do saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) para os períodos de observações estudados de 1961 a 1982, 1993 a 2015 e 2016 a 2022, para a cidade de Sete Lagoas, MG. De 1961 a 1982, a maior média mensal de radiação solar global foi de  $21,38 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em agosto, contrastando com uma menor média mensal de  $16,76 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em maio. Já em relação ao equilíbrio da radiação, janeiro registrou uma maior média mensal de  $11,80 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , enquanto junho apresentou uma menor média mensal de  $5,28 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  (Figura 7a). No período subsequente, de 1993 a 2015, os valores de radiação solar global permaneceram próximos, com uma maior média mensal de  $22,05 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em outubro e uma menor média mensal de  $16,15 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em maio. Já os valores do equilíbrio de radiação foram estimados com maior média mensal de  $11,93 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em janeiro e menor média mensal de  $5,17 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em junho (Figura 7b). Por fim, no período de 2016 a 2022, houve uma maior média mensal de radiação solar global de  $21,95 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em janeiro, enquanto junho registrou uma menor média mensal de  $14,80 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . No que diz respeito ao equilíbrio de radiação, janeiro teve a maior média mensal de  $12,32 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ , e junho apresentou menor média mensal de  $5,25 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  (Figura 7c).

Com base nos resultados analisados, conclui-se que a radiação solar global apresenta uma intensidade maior do que o equilíbrio de radiação, sendo que  $R_g$  variou significativamente no seu comportamento sazonalmente comparado ao saldo de radiação. Onde as maiores médias mensais registraram nos meses de agosto, outubro e janeiro para cada período, respectivamente, enquanto suas menores médias mensais apresentam nos meses de maio, maio e junho. Ou seja, no inverno, primavera e verão obteve-se maiores médias mensais de  $R_g$  e no outono e inverno obteve-se as menores médias mensais de  $R_g$ .

Isso acontece devido a fatores como a refletividade da superfície (albedo), a presença de nuvens, a composição atmosférica e a sazonalidade. Além disso, diferentes estações do ano e latitudes afetam a inclinação do sol e a quantidade de radiação solar incidente.

Figura 7 - Comportamento médio mensal de radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) e saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) para Sete Lagoas, MG, nos períodos de observações estudados: (a) 1961 a 1982, (b) 1993 a 2015 e (c) 2016 a 2022.



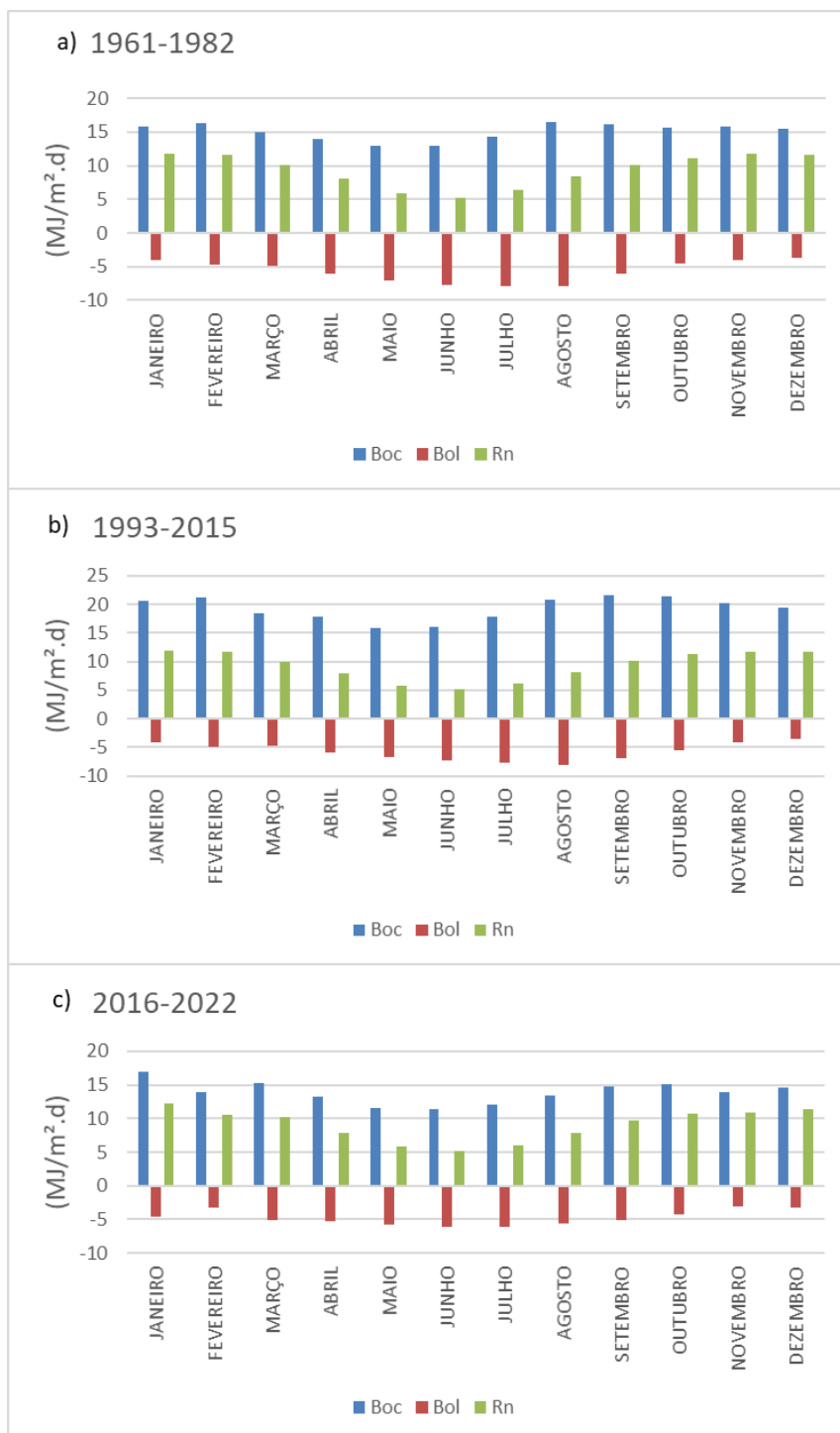
## 5.5 BALANÇO DE ONDAS CURTAS E BALANÇO DE ONDAS LONGAS.

Na Figura 8 , é possível observar o comportamento das médias mensais do balanço de ondas curtas (BOC) e do balanço de ondas longas (BOL) em relação ao saldo de radiação ( $R_n$ ). Nota-se que nos períodos de 1961 a 1982 foi registrado o valor maior da média mensal de BOC de  $16,45 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em agosto e valor da menor média mensal de  $12,90 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em maio (Figura 8a). No período de 1993 a 2015, foi observada a maior média mensal de BOC de  $21,55 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em setembro e menor média mensal de  $15,90 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em maio (Figura 8b). Já no período de 2016 a 2022, verificou-se a maior média mensal de BOC de  $16,90 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em janeiro e menor média mensal de  $11,39 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em junho (Figura 8c).

Ao compararmos as maiores e menores médias mensais do BOC, observa-se uma diferença da intensidade de BOC no período de 1993 a 2015 onde sua maior média mensal superou os valores quando comparado aos demais períodos. Além disso, é possível observar que no balanço de ondas curtas as maiores médias mensais ocorreram nos meses de agosto, setembro e janeiro, respectivamente, enquanto o BOC os valores da menor média mensal ocorreram nos meses de maio, maio e junho, respectivamente. Devido aos resultados encontrados observa-se que a maior média mensal de BOC durante os períodos estudados teve uma maior variabilidade na sua intensidade e no seu comportamento sazonal. O aumento do Boc em setembro no período de 1993 a 2015 pode ser atribuído diretamente ao aumento da radiação solar global nesse mesmo período e mês.

Ao analisarmos o (BOL), observa-se que no período de 1961 a 1982 a maior média mensal do BOL é de  $-7,99 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em agosto, enquanto a menor média mensal é de  $-3,74 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em dezembro (Figura 8a). No período de 1993 a 2015, a maior média mensal do BOL é de  $-8,02 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em agosto, e a menor média mensal é de  $-3,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em dezembro (Figura 8b). Já no período de 2016 a 2022, a maior média mensal do BOL é de  $-6,14 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em junho, e a menor média mensal é de  $-3,14 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  em novembro (Figura 8c). Foi observado que no período de 2016 a 2022 houve uma discreta disparidade nos valores da maior média mensal de BOL em comparação com os demais períodos. Essa diferença pode ser atribuída a fatores como a cobertura de nuvens, as temperaturas do ar e do solo, e os níveis de dióxido de carbono e umidade atmosférica da superfície estudada.

Figura 8 - Comportamento médio mensal do balanço de ondas curtas (Boc) e do balanço de ondas longas (Bol) em relação ao saldo de radiação (Rn) em Sete Lagoas - MG, para os períodos de observações estudados: (a) 1961 a 1982, (b) 1993 a 2015 e (c) 2016 a 2022.





## 6 CONCLUSÃO

A estimativa do saldo de radiação, ou seja, a energia disponível, pelo método do balanço de ondas curtas e longas encontraram semelhança sazonal para todos os períodos estudados, o que permitiu constatar a energia disponível na cidade de Sete Lagoas, MG, com maiores disponibilidades de energia no verão com valor médio de  $12,74 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e primavera com valor médio  $11,60 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e com menores disponibilidades de energia no outono com o valor médio de  $6,85 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$  e no inverno com valor médio de  $6,14 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ . Soma-se a isso, a estimativa da radiação solar global ( $R_g$ ) incidente pelo método de Angström-Prèscott, que variou significativamente no seu comportamento sazonal, onde no inverno, primavera e verão obteve-se maiores médias mensais de  $R_g$  e no outono e inverno obteve-se as menores médias mensais de  $R_g$ .

Essa energia se revela de suma importância devido ao seu impacto direto em diversas áreas da vida urbana e na compreensão do clima local. Ao analisar o equilíbrio entre a radiação solar recebida e a radiação refletida e absorvida pela superfície, é possível entender como os fatores climáticos satisfizeram o ambiente urbano, a qualidade do ar, a disponibilidade de energia solar para geração de eletricidade, a produção agrícola e disponibilidade recursos hídricos.

Dessa forma, o verão e a primavera mostram momentos ideais que podem ser utilizados na geração de energia fotovoltaica em Sete Lagoas-MG. A maior disponibilidade de energia solar nesses períodos também contribui para a redução dos custos de eletricidade e diminuição da dependência de fontes de energia convencionais, tornando a energia fotovoltaica uma opção mais sustentável e ambientalmente amigável para a cidade.

Portanto, ao considerar a maior intensidade da disponibilidade de energia solar no verão e na primavera, a energia fotovoltaica surge como uma alternativa promissora e viável para a geração de eletricidade em Sete Lagoas, MG, trazendo consigo benefícios significativos para o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida da população local.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BABU, N. et. al. *Performance analysis of residential solar photovoltaic systems in different climatic zones*. Renewable Energy, n. 168, p. 573-586, 2021.

BRAGA, Benedito et al. *Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/>. Acesso em 20 de junho de 2023.

BRITO, G. et. al. *Análise de viabilidade econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos em empresas do setor industrial em Minas Gerais*. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 9 (2), p. 109-120, 2020.

CONTES, M. V. et. al. *Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação diário para o município de Botucatu - São Paulo - Brasil*. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, MS, v. 29, Jul. / Dez. 2021, ISSN 2237-8642. Acesso em 20 de junho de 2023

CALLEJAS, I. J. A. et. al. *Variação do balanço de energia em cidade localizada na região central do Brasil*. Mercator, Fortaleza, v. 15, n. 3. p. 85-106, jul./set., 2016. ISSN 1984-2201

CREWS, F; L. et. al. *Análise comparativa de modelos matemáticos para estimativas do saldo de radiação em áreas de pastagens*. Revista Brasileira de Geografia Física, Pernambuco, v. 10, n. 06, 2017. ISSN 1889-1897. Acesso em 15 maio de 2023

FERREIRA, M. J. et. al. *Variação sazonal do balanço de energia na superfície urbana da cidade de São Paulo, Basil*, 2004.

FERREIRA, W. P. M. *Radiação solar em Sete Lagoas, MG*. – Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. ISSN 1518-4277.

FERREIRA, W. P. M. *Estimativa da radiação solar diária em Sete Lagoas - MG baseada em dados de insolação*. — Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008.

FUNARI, F. L. et. al. *Estudo comparativo entre as equações de Brunt Penman e Linacre (1968), para estimativa da radiação líquida*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. Londrina, 1985. 77-82

GUERRA, A. et. al. *Energy storage impact on economic feasibility of photovoltaic systems in an industrial milk factory in Brazil*. Energy Reports, n. 3, p. 70-75, 2017.

GUSMÃO, A. C. V. L, et, al. *Determinação do saldo radioativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB. v. 16, n. 10, p. 1107-1114, 2012.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). *Mudança Climática 2013: A Base da Ciência Física*. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Cambridge University Press, 2013.

LOPES JÚNIOR, J. M. P. et. al. *Balanço de radiação de cana-de-açúcar na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas, Brasil*. Revista Brasileira de Climatologia, Dourados, MS, v. 32 Jan. / Jun. 2023. ISSN 2237-8642. Acesso em 12 de abril de 2023

LOUWEN, A. et. al. *Performance of residential photovoltaic systems in a densely populated area*. Energy Procedia, n. 97, p. 356-369, 2019.

SCHÖFFEL, E. R. VOLPE, C. A. *Estimativas da radiação líquida em superfície gramada em Jaboticabal (SP)*, 1999.